

气泡雾化喷嘴液雾特性^{*}

岳连捷, 俞 刚

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 为了研究静止空气中气泡雾化喷嘴的液雾特性, 利用粒子多普勒分析仪 (PDA) 和 Mie 散射显示法, 对气泡雾化喷嘴在水压 2.5MPa 和 3.4MPa 条件下, 较宽气液比范围内的液雾的张角、粒度及速度分布进行了测量, 分析了水压、气液比、两股射流相互作用对液雾的影响。结果表明, 气泡对液体射流的雾化具有较大的增强作用, 同时发现存在一临界气液比 (介于 3%~4% 之间), 当气液比达到临界值后, 射流的雾化突然增强, 且运行稳定。

关键词: 气泡; 雾化; 液雾特性⁺; 超音速燃烧; 二相流

中图分类号: V231.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 04-0348-05

Studies on spray characteristics of barbotaged atomizer

YUE Lian-jie, YU Gang

(Inst. of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract: The spray characteristics of barbotaged atomization in quiescent atmosphere by using Particle Dynamics Analyzer (PDA) and Mie-Scattering were experimentally investigated. The experiments were conducted in a wider gas/liquid mass ratio (CLR) and the water injection pressure 2.5MPa and 3.4MPa respectively. The major parameters of spray including velocity, drop size and initial expansion angle were measured and their dependence on injection pressure, CLR and interaction of two sprays were analyzed. Results show that the drop size decreases and the initial expansion angle of the spray increases significantly with barbotaged atomization. It was found that there existed a critical CLR value around 3%~4%, and the spray being enhanced abruptly and performed steady after the critical value reached.

Key words: Air bubble; Atomization; Spray characteristics⁺; Supersonic combustion; Two phase flow

1 引 言

在有限的时间内 (约 1ms) 保证液体喷雾的快速气化、有效混合是超燃冲压发动机成功运行的先决条件。这就对液体碳氢燃料的喷射提出了两个基本要求: (1) 燃料液滴的尺寸尽可能小, 以便迅速的蒸发; (2) 贯穿尽可能深, 张角尽可能大, 以便均匀的混合。

气泡雾化喷嘴是在液体射流喷射孔的前室引入一股气体, 使液体变成气液湍流两相流, 当两相流喷出喷嘴后, 液相中较高压力的气体泡将膨胀破裂将包围它的液膜破碎, 获得增强雾化的效果^[1]。Lefebvre 等人利用 Marlvorn 测雾仪测量了气泡雾化喷嘴在小于 6.9MPa 水压下的粒度^[1~4], 发现随气液比和水压

的增加液滴尺度减小, 而喷射孔直径、进气孔影响较小。因测试仪器的限制, 无法测量液雾的速度及在空间上粒度的分布, 也没有给出液雾的张角。

文献[5~7]利用激光显示技术对所用气泡雾化喷嘴喷射口附近两相流动及在横向超声气流中的喷雾图像进行了显示, 发现依赖供气量的多少, 气泡雾化存在两种雾化现象: 当气液比较小时, 喷嘴内两相流为泡状流或塞状流流态, 气泡不是连续的, 导致液雾出现气泡雾化和纯压力雾化随机交替发生的现象, 液雾发生脉动; 对于较大的气液比, 喷嘴内两相流为环状流态, 液雾处于连续的气泡雾化状态, 极大地改善了燃油的雾化质量。上述气泡雾化喷嘴的研究中, 雾化气由插入混合室的中心导管引入, 液体由环形管

^{*} 收稿日期: 2002-08-15; 修订日期: 2003-01-13。基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (10102022), 重点基金 (1023060) 和 863 项目资助。

作者简介: 岳连捷 (1972—), 男, 博士后, 研究领域为超燃冲压发动机燃烧室液态碳氢燃料燃烧的实验与计算。

路引入。俞刚采用了不同的气泡雾化喷嘴,雾化气由环形管路引入,促进气液之间的搅拌掺混,增强两相流的湍流度,使雾化张角显著增大,获得了较好的效果^[8]。本文不仅利用 PDA 对文献[8]所采用喷嘴的液雾进行了测量,还对相应的液雾进行了显示,便于更全面、直观地了解气泡雾化的特性。

2 实验方案

2.1 气泡雾化喷嘴结构

图1是气泡雾化喷嘴的结构示意图。液体和雾化气在一 $\phi 4\text{mm}$ 的混合室内混合,液体通过与混合室同轴的内径 $\phi 1\text{mm}$ 的细管供入混合室,细管末端和喷嘴出口之间的距离为 15mm ;雾化气垂直于混合室轴线方向供入,并沿内外管之间的环形空隙流动。混合室顶端为 $\phi 0.5\text{mm}$ 的圆形喷射孔,长度为 2mm 。

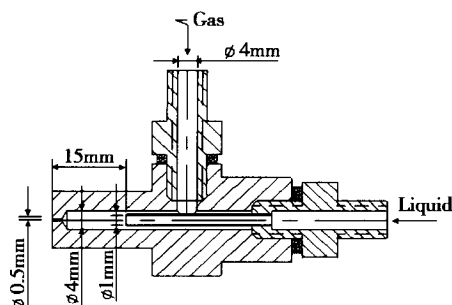


Fig.1 Cross-sectional view of barbotaged atomizer

2.2 实验设备

用水代替液体燃料作为工作介质,雾化气采用氮气。水压通过高压氮气驱动活塞获得,液体流量通过计量喷射时间及液体容器内活塞的移动位置确定;雾化气也由氮气瓶供应,流量由经过标定的孔板流量计测量,孔板前后静压差通过量程为 $0 \sim 120\text{kPa}$ 的 CYB-1151 型电容式差压变送器将电信号传入计算机,基本误差为 $\pm 0.25\%$ 。高压氮气通过减压阀和快速开关高压气体的电磁阀来调节控制。气液比的调整通过保持液压不变而改变气压来实现。

2.3 测试设备

采用 DANTEC-60 二维粒子多普勒分析仪(PDA)对液雾的粒径及速度进行了测量。PDA 的基本原理是利用光学多普勒效应,用四束激光(其中两束蓝光,两束绿光,分别位于相互垂直的平面上)在喷雾场中相交于一点,成一椭球形测量体。蓝光与绿光在测量体内形成明暗相间的干涉条纹。当粒子穿过测量体时,引起干涉条纹变化,产生多普勒信号。信号处理

机根据该信号的频移计算粒子的速度,根据接收多普勒信号的相移计算粒子的大小。因此可以同步测量粒子的速度和大小,这对于喷雾场的测量非常重要。

激光相多普勒测试系统主要包括由氩离子激光器与分光彩色变频部件组成的入射光学系统、相多普勒接收光学系统和信号数据处理系统等部分。

PDA 的发射镜头和接收镜头固定在二维位移机构上,其位移方向及位移步长由计算机控制。预先设定测量位置,然后自动测量。发射镜头采用焦距为 $f = 600\text{mm}$ 的镜头,接受镜头采用焦距为 $f = 500\text{mm}$ 的镜头。可测喷雾的最大速度为 280m/s ,粒子直径范围为 $1\mu\text{m} \sim 284\mu\text{m}$,直径测量采用二次折射后向接收方式。测速和测粒的精度分别为 1% 和 4% ,体积通量测量的误差要高一些,但定性上是准确的。

3 实验结果及分析

本文实验中液雾沿水平方向直接喷入静止大气,没有外部气流对液雾的影响,这样可以孤立因素考虑气泡雾化喷嘴本身的性能。

3.1 液雾图像显示

液雾图像是在自然光照射下的 Mie 散射图,由数字摄像机记录,图 2(a~c)和图 2(d~f)分别是水压 3.4MPa 和 2.5MPa 时不同气液比条件下的液雾图像。当喷嘴不供气时,处于压力雾化状态,如图 2(a),(d),此时液雾张角很小,在喷嘴附近能看到明显的液柱,雾化质量不高;引入适量雾化气后,由于气泡一离开喷嘴进入低压环境,立即膨胀将包围它的液膜破碎,因此看不到液柱区,同时液滴也获得了较高的径向速度,喷雾张角较压力雾化状态时大。实验中发现存在一临界气液比($3\% \sim 4\%$),气液比过小,液雾会产生脉动振荡,且伴随有噪音,这可能是由于不连续的两相流态(如泡状流、塞状流)而造成液雾的不稳定;当达到临界气液比时,射流的雾化获得突然增强,在喷嘴出口处张角达到 40° ,且液雾运行稳定(见图 2(b),(e)),文献[5,6]中也发现气液比一般在接近 3% 时,液雾就已处于稳定的环状流连续破碎状态。由图还可观察到一特殊的现象,随液雾向下游运动,液雾张角有一逐渐减小的过程;进一步增大供气量,如图 2(c),(f),雾化张角变化不大,肉眼能观察到液雾中水量的减少。

3.2 液雾测量与结果分析

在实验过程中,测量点选取在通过液雾中心线的纵向剖面上。 x 为轴向位置, y 为径向(纵向)坐标,坐标原点取在喷射口截面的圆心。

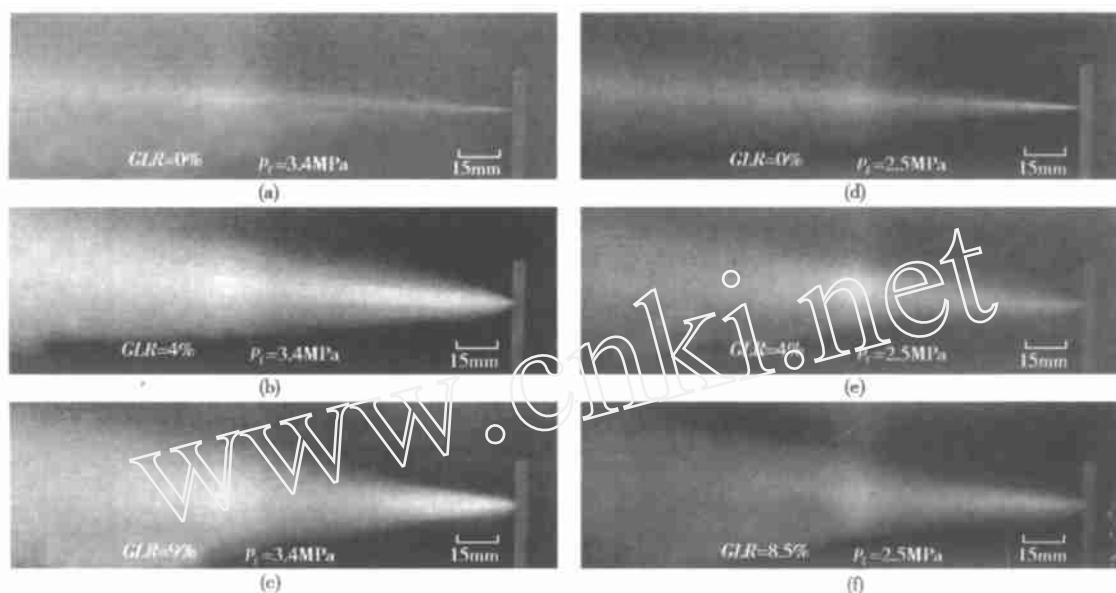


Fig. 2 Pictures of spray with barbotage and without barbotage

GLR—gas/liquid mass ratio; p_t —water injection pressure

3.2.1 气泡雾化与压力雾化特性的对比分析

由图 3(a) 可见, 水压为 3.4MPa 时, 距喷嘴 120mm 下游, 气泡雾化液雾 SMD 在 $30\mu\text{m}$ 左右, 而压力雾化液滴尺寸为 $90\mu\text{m}$, 相对于压力雾化, 气泡雾化液滴的尺度大大减小, 且液雾分布范围要宽得多, 在液雾外围区域液滴直径较大, 内部为小液滴。

图 3(b) 显示, 无论气泡雾化还是压力雾化, 在轴线处液滴轴向速度最大, 而外围速度较慢。这是由于喷嘴粘性边界层的影响, 外围的液滴来源于紧靠壁面的低速液体。还可看到, 在 120mm 下游两种雾化方式的速度差别较小。但这是否可以说明在喷嘴出口处两种雾化方式获得了相同的液滴速度呢?

分析单粒子在静止空气中的运动, 忽略重力影响, 仅考虑气动阻力的作用, 假定粒子沿直线运动(在

喷嘴附近区域基本合理), 可得到液滴的运动方程^[9]

$$\ln(|v|/|v_0|) = -C_D \frac{3}{4d} \frac{\rho_g}{\rho_l} |r| \quad (1)$$

其中 v 为粒子速度, d 为液滴直径, ρ_g 代表空气密度, ρ_l 代表液体密度, r 为液滴的位置矢量, C_D 为阻力系数, v_0 为喷嘴出口处液滴速度。

可见, 粒子在向下游运动过程中, 由于气动阻力的作用速度减慢, 且尺度越小的粒子速度衰减越快。在距喷嘴 120mm 下游, 两种雾化方式的速度大致相当。考虑压力雾化液滴直径较大, 速度衰减较慢, 在喷嘴出口处气泡雾化喷嘴的液滴具有较高的速度。这说明气泡雾化液滴的速度不仅来源于压力势能, 在喷嘴内部气液两相流动中, 气相具有相对较高的流动速度, 由于粘性的作用将带动相邻的液相加速。

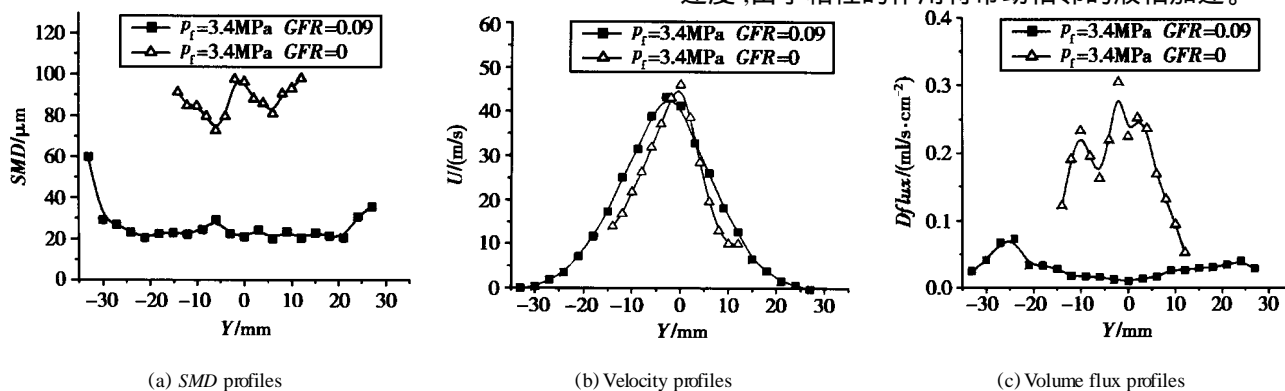
Fig. 3 Comparison of barbotaged spray with pure pressure spray ($X = 120\text{mm}$) U —Axial velocity of drops; SMD —Sauter mean diameter; $Dflux$ —Volume flux

图 3(c) 显示, 压力雾化液滴质量主要集中在轴线附近区域, 而气泡雾化大部分液滴处于接近液雾外围的环形区域内。压力雾化由于壁面边界层的影响, 在外围液体流速较低, 通量较小; 而对于气泡雾化, 在稳定的喷雾状态下处于环状流状态, 液相在外环包围着气相, 这使得在气泡炸裂过程中, 液滴大部分处于液雾的外围附近区域, 也就是低速区域内。

由以上分析可知, 气泡雾化喷嘴获得了小尺度、大张角、高速度的液雾。在液雾内部区域, 液滴具有相对较高的速度和较小的尺度, 但大部分液滴处于接近液雾外围的低速区域内。

3.2.2 液雾特性沿轴向的变化

由图 4 可见, 在液雾向下游运动中, 向外围扩张, 分布区域变广, 且由于气动阻力的作用使其速度有所降低。图 4(b) 还显示, 在下游 30mm 至 120mm 距离内, 液滴尺度的变化不大, 粒径仅略微减小, 这说明在 30mm 前液相的剧烈的变形破碎过程基本完成。离喷嘴更近距离处因液雾太浓没有进一步测量, 无法断定液雾破碎基本完成的位置, 一般认为气泡雾化在喷嘴出口附近就已完成破碎, 由图 2 也看到液相一离开喷嘴就开始雾化。在图 4(a) 中距喷嘴 30mm 下游处, 轴线附近的液滴达到了 100m/s 的速度, 而根据理想流

体伯努利方程, 在 3.4MPa 油压下, 液滴的速度最高为 82m/s, 这也说明, 气泡雾化喷嘴中气相对液相有加速的作用, 液滴获得了较高的速度。

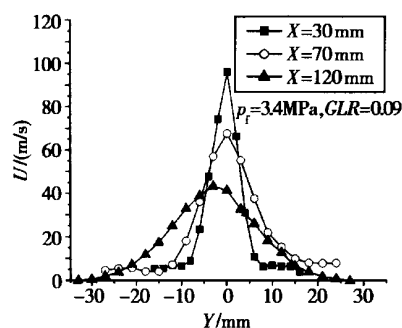
3.2.3 气液比的影响

图 5 显示水压条件下相同时高的气液比可获得较细的粒径分布, 前人的研究也反映了这一规律^[1~6]。较高的气体流量, 使得两相流中, 气相所占的体积分数增长, 在喷嘴通道内气相会将液相压成更小的或更薄的膜, 因此在破碎过程中形成更细小的液滴。

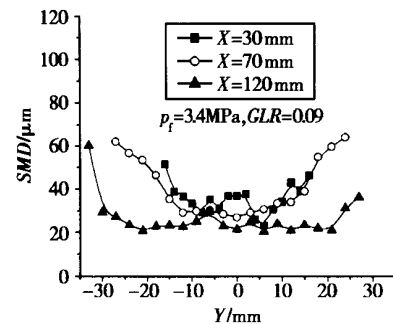
尽管在距喷嘴 120mm 处大气液比条件下液滴速度仅比小气液比略高一点, 但因其获得的液滴尺度较小, 因而速度衰减较快, 可推断在喷嘴出口处, 大气液比条件下液滴的速度较高。随气液比增加, 气相的速度增长, 进而带动液滴速度加快。

3.2.4 供水压力的影响

图 6 显示了相当的气液比条件下水压分别为 2.5MPa 与 3.4MPa 时液雾的粒度及速度分布, 可见, 两液雾具有相当的液滴尺度, 低水压条件下液雾粒径略大, 这说明对于气泡雾化喷嘴气液比是决定其雾化质量的决定性影响因素。液滴的速度则随水压而变化, 较低的水压液滴的速度也较小。

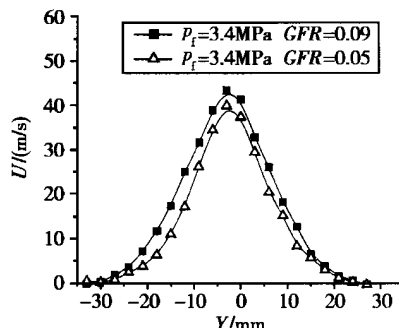


(a) Axial velocity profiles

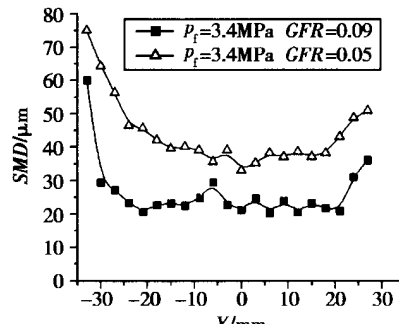


(b) Drop size profiles

Fig. 4 Spray profiles at different axial location

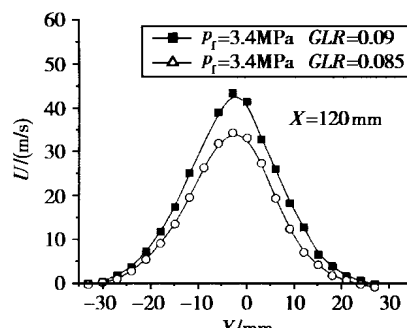


(a)

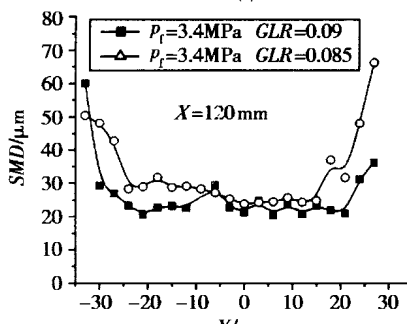


(b)

Fig. 5 Effect of GLR on spray profiles of velocity and SMD



(a)



(b)

Fig. 6 Effect of water injection pressure on spray profiles of velocity and SMD

3.2.5 两股液雾的相互作用

由图 7 可见,在喷嘴下游一定距离处相距 15mm 两喷嘴的喷雾已经相交。图 8 也显示在喷嘴下游 30mm 处,单喷嘴喷雾的速度型在边缘遭到破坏。由液雾尺寸分布图可见,对单个喷嘴而言,液滴尺度分布仍然呈大粒子在喷雾外围的形态,但在相交处由于液滴之间的碰撞其分布型发生改变,在两喷雾相交后

外围液滴尺寸反而下降,大尺度液滴消失。一般来说,液滴之间的碰撞可能会:弹性碰撞、碰撞聚合、碰撞后先聚合后又各自分开、碰撞后破碎成一较大颗粒和许多较小颗粒、碰撞后破碎成小颗粒^[9]。图 8 的结果说明液滴之间的相互碰撞,导致两粒子继续破碎,形成了更小的颗粒。



Fig. 7 Picture of interaction of two spray

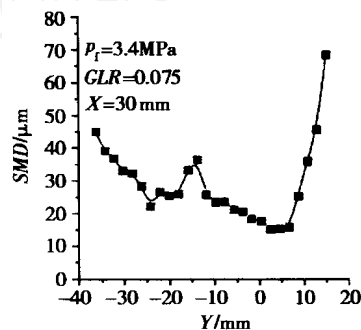
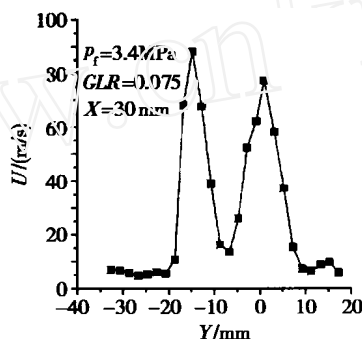


Fig. 8 Effect of interaction of two spray on spray characteristics

4 结 论

(1) 气泡雾化喷嘴液滴尺度大大降低,速度有所提高,喷雾张角显著增长。存在一临界气液比(3%~4%),当达到此临界气液比后,雾化突然增强,张角可达 40°,且运行稳定,120mm 下游处液雾平均粒径为 30μm~45μm。可见,气泡雾化是增强液体雾化的有效途径;(2) 气泡雾化的液雾在轴线附近区域具有较小的尺度和较高的速度,但大部分液滴集中在接近液雾外围的低速区。而压力雾化液雾质量主要集中在轴线附近的高速区;(3) 两股液雾的碰撞导致在交界处粒子进一步破碎,尺度减小;(4) 液滴尺寸随气液比和水压的增加而减小,速度随气液比和水压的增加而增大。

参考文献:

- [1] Lefebvre A H, Wang X F, Martin C A. Spray characteristics of aerated-liquid pressure atomizers[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1988, 4(4).
- [2] Roesler T C, Lefebvre A H. Studies on aerated-liquid atomization[J]. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 1989, 6(3&4).

- [3] Wang X F, Chin J S, Lefebvre A H. Influence of gas injector geometry on atomization performance of aerated-liquid nozzles[J]. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 1989, 6.
- [4] Chen S K, Lefebvre A H, Rollbuhler J. Influence of ambient air pressure on effervescent atomization[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1993, 9(1).
- [5] Lin K C, Kirkendall K A, Kennedy P J, et al. Spray structures of aerated liquid fuel jets in supersonic crossflows[R]. AIAA 99-2374.
- [6] Lin K C, Kennedy P J, Jackson T A. Structures of internal flow and the corresponding spray for aerated-liquid injectors[R]. AIAA 2001-3569.
- [7] Santangelo Philip J, Sojka Paul E. A holographic investigation of the near nozzle structure of an effervescent atomizer produced spray[J]. *Atomization and Spray*, 1995, 5.
- [8] Yu G, Li J G, Chang X Y. Investigation of fuel injection and flame stabilization in liquid hydrocarbon-fueled supersonic combustors[R]. AIAA 2001-3608.
- [9] 方丁酋. 两相流动力学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1988.

(编辑:王居信)